

# 强化塘 - 人工湿地复合生态塘系统中氮和磷的去除规律

曹向东<sup>1</sup>, 王宝贞<sup>2</sup>, 蓝云兰<sup>1</sup>, 刘鸿亮<sup>3</sup>

(1. 深圳市龙岗区环境保护局, 广东 深圳 518172; 2. 哈尔滨建筑大学, 黑龙江 哈尔滨 150006; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 在大量分组试验(中试)数据的基础上,剖析了强化厌氧塘、兼性人工湿地、强化好氧塘和水生植物根系塘的最佳工艺参数以及整体系统的组合性能,探讨了氮和磷元素在各单元塘以及系统中的迁移、降解规律。实验表明,在该组合形式的系统中,各级单元塘之间具有较强的互助和互补性,前面单元为后续单元提供了较好的前处理,使得后续单元能够较充分地发挥处理功效,同时由于结合了在厌氧、兼氧以及好氧状态下微生物、高等绿色植物根系、土壤(砂层)的同化、分解、截流、吸收、吸附和过滤等处理机制,使得该系统较传统稳定塘工艺具有更高的氮和磷的去除效率。

**关键词:** 强化塘; 人工湿地; 氮; 磷; 去除规律

**中图分类号:** X17      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001 - 6929(2000)02 - 0015 - 05

## Removal of Nitrogen and Phosphorus in the Pond-Wetland Combined System

CAO Xiang-dong<sup>1</sup>, WANG Bao-zhen<sup>2</sup>, LAN Yun-lan<sup>1</sup>, LIU Hong-liang<sup>3</sup>

(1. Longgang Environmental Protection Bureau, Shenzhen, Guangdong 518172;

2. Harbin University of Architecture and Engineering, Harbin, Heilongjiang 150006;

3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012)

**Abstract:** On the basis of plenty of data from pilot-scale batch experiments, the optimal process parameters for intensified anaerobic pond, facultative wetland, intensified aerobic pond and root-zone pond as well as the combined properties of the integrated system were investigated. The transport and degradation rules of nitrogen and phosphorus in both the cell ponds and the whole system were also explored. The experiments showed that in the combined system, there are great cooperative and complementary mechanisms among the cell ponds. One cell provides the pretreatment for the subsequent cell, which makes the subsequent cell play full roles. Simultaneously, duo to combination of all the treatment mechanisms such as assimilation, decomposition, interception, absorption, adsorption and filtration of microbes, wetland roots and soil under the anaerobic, facultative and aerobic conditions, the system has higher nitrogen and phosphorus removal efficiencies than normal pond systems.

**Key words:** intensified pond; wetland; nitrogen; phosphorus; removal

在稳定塘和人工湿地系统中,氮的去除机理是十分复杂的,主要是由于氮存在形式的多样性,包括有机氮、氨氮、铵离子氮( $\text{NH}_4^+$ )及硝酸盐氮( $\text{NO}_3^-$ )等,通过氧化还原而相互转化。概括地说,氮的去除作用包括:塘内微生物、藻类、水生生物以及植物根系的吸收—吸附作用、硝化—反硝化作用和挥发作用等。磷的去除是通过塘内微生物、藻类、水生生物和植物根系的吸收作用以及生物的、化学的或物理的过程,在稳定塘系统中正磷酸盐可以直接参与生物反应,而聚磷酸盐的水解作用缓慢;另外,工业废

水中可能含有有机磷<sup>[1]</sup>。磷在稳定塘系统中的净化作用包括各种微生物和生物的吸收、吸附和沉淀作用等。

稳定塘和人工湿地一般是按照  $\text{BOD}_5$  的去除负荷进行设计的,而不将氮和磷作为限制设计参数。有研究表明,当系统  $\text{BOD}_5$  表面负荷不大于  $20 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$  或水力停留时间不短于 12 d 时,氨氮去除率可达 65% ~ 70%,而当  $\text{BOD}_5$  表面负荷为  $13 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$  和水力停留时间为 12 d 时,磷酸盐去除率可按 60% 设计<sup>[2]</sup>,由此可见,结合氮和磷元素的迁移、降解规律,探讨稳定塘及人工湿地的最佳工艺参数以及整体系统的组合性能,对今后塘系统的设计和运行,具有十分重要的意义。

收稿日期:1999 - 08 - 24

作者简介:曹向东(1965 - ),男,北京人,工学博士。

# 1 试验研究方法

## 1.1 工艺流程及构造

试验塘系统由强化厌氧塘、兼性人工湿地、强化

好氧塘和水生植物根系塘组成,在塘的构造上,为了改善系统的水力特性,厌氧塘和好氧塘内加设了布水穿孔板以及出水堰,其工艺流程见图 1。

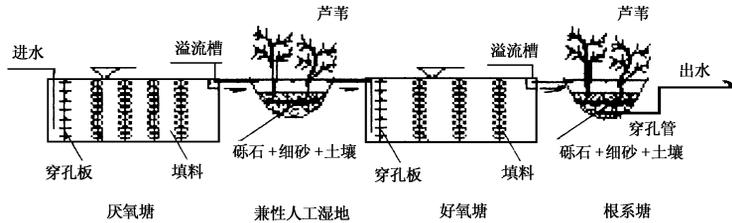


图 1 试验工艺流程图

Fig. 1 Flowsheet of the experimental combined pond-wetland system

在试验期间,污水取自附近生活小区的下水管道,原水水质在冬、夏季变化较大,BOD<sub>5</sub> 为 52 ~ 140 mg/L,NH<sub>3</sub>-N 为 16 ~ 44 mg/L,NO<sub>3</sub>-N 为 0.12 ~ 0.37 mg/L,NO<sub>2</sub>-N 为 0.02 ~ 0.2 mg/L,TN 为 21 ~ 55 mg/L,TP 为 2.4 ~ 7.0 mg/L;试验期跨越的室外季节温度为 -16 ~ 35 ℃,记录的水温范围为 0.8 ~ 28 ℃。

### 1.2 工艺设计参数的确定

整个试验包括在植物生长期和非植物生长期内进行的 4 个不同温度段(水温)的分组试验,在不同温度段调整各级单元塘的进水有机负荷,并采样监测,试验以出水达到二级排放标准作为试验目标,总水力停留时间从夏季的 4 d 到冬季的 22 d 之间变化。复合生态塘系统的各单元工艺控制参数见表 1。

#### 1.2.1 强化厌氧塘

厌氧塘一般可以根据 BOD<sub>5</sub> 表面负荷率进行设

计。考虑到北方寒冷地区低温时微生物活性较低、进水浓度增加以及水力条件等因素,厌氧塘的 BOD<sub>5</sub> 有机负荷取 200 ~ 500 kg/(hm<sup>2</sup>·d),水力停留时间 5 ~ 7 d<sup>[3-5]</sup>。实际运行数据表明,较高的有机负荷及较短的停留时间能使塘减小热量损失,保证厌氧菌的生存条件。

#### 1.2.2 兼性人工湿地

在该系统中,漫流人工湿地在处理功能上是一个兼氧性的稳定塘。一般认为,兼性塘的设计水力停留时间的长短应根据当地的气象条件、设计进出水质以及当地的客观条件确定。从目前我国北方 3 座稳定塘系统的实际运行情况看,兼性塘 BOD<sub>5</sub> 面积负荷在 120 ~ 160 kg/(hm<sup>2</sup>·d)之间,污水在塘中停留 10 ~ 15 d 左右,均取得较满意的去除效果<sup>[3-5]</sup>,而且较长的水力停留时间,有利于污水中氮和磷的去除,但是,由于受试验场地的限制,该系统的兼性人工湿地最长停留时间仅为 3 d(见表 1)。

表 1 不同温度段内复合生态系统中各级单元塘工艺参数值

Table 1 Process parameters of cells in the combined ecological system under different temperature segments

单元塘	进水 BOD <sub>5</sub> 浓度(mg/L)				进水 BOD <sub>5</sub> 负荷(kg/(hm <sup>2</sup> ·d))				水力停留时间(d)			
	0~8	8~12	14~20	20~26	0~8	8~12	14~20	20~26	0~8	8~12	14~20	20~26
强化厌氧塘	66.34	62.82	56.86	64.78	99.51	158.41	313.9	707.2	6.70	4.00	1.98	1.03
人工湿地	50.07	49.82	41.25	30.66	73.07	128.9	224.9	271.8	2.90	1.06	0.76	0.47
强化好氧塘	39.39	25.14	28.45	20.16	54.36	62.33	148.50	171.30	7.25	4.34	1.98	1.40
植物根系塘	26.89	23.17	18.67	12.45	36.48	55.71	94.69	75.30	3.04	1.95	0.98	0.79

#### 1.2.3 强化好氧塘

对于北方寒冷地区好氧塘的设计,若只考虑植物生长期的去除效果,不考虑冬季储存或少排的塘容积,好氧塘的设计水力停留时间为 8 ~ 10 d,BOD<sub>5</sub>

有机负荷一般在 65 ~ 190 kg/(hm<sup>2</sup>·d)之间(推荐值 70 kg/(hm<sup>2</sup>·d))<sup>[3-5]</sup>。另外,在高负荷状态下运行的好氧塘,宜采用曝气、装置填料等强化措施,或设置水生植物塘、养鱼塘作深度处理。

### 1.2.4 根系塘

温度及有机负荷是根系塘设计中的重要参数,有机负荷过大将导致根系塘的阻塞、处理效率的下降以及臭气的产生。为了尽量避免溢流的发生,应考虑采用细砂、砾石和粘土构成的混合介质。对于纯土壤介质根系塘建议的水力负荷为 2~9 m/d,对于砾石和砂的介质系统可以采用 5~16 m/d 的水力负荷<sup>[6]</sup>。Conley 的研究认为,当温度大于 7 时,根系塘的表面完全是用于满足氧的传质速率(Reed 等人建议的氧转质速率为 20 g/(m<sup>2</sup>·d))。目前德国、丹麦、英国及美国正在运行的 40 座根系塘中,水力停留时间最短为 1.2 d,最长为 24.6 d,BOD<sub>5</sub> 有机负荷在 3.2~27.8 g/(m<sup>3</sup>·d)之间<sup>[6]</sup>。

根系床的深度一般为 0.3~1.2 m 之间,其中以 0.6 m 最为常见,坡度一般为 0~3%。0.6 m 的高度比较接近于植物能够有效生长的最大高度,因此能够尽可能地利用根系床的有效容积。

## 2 结果与分析

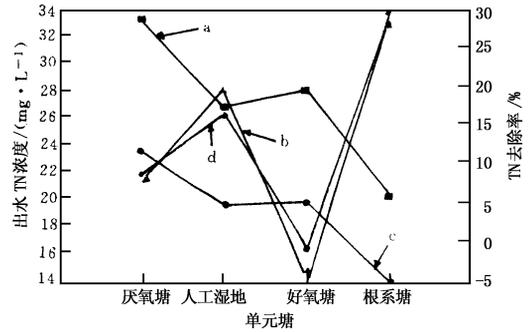
### 2.1 氮的去除规律

稳定塘对氮的去除取决于细菌分解有机氮产生氨氮,藻类、高等水生植物利用光合作用摄取一定量氨氮以及细菌等吸收同化氨氮协同作用的结果,此外,不同的实验研究表明,进入系统的氧化态氮越少,总氮的去除效果越有效。

#### 2.1.1 植物生长期

试验期间,进水的平均总氮浓度在 25.75~36.14 mg/L 之间变化,整个系统对总氮的去除率为 43.91%~46.53%(相应的有机负荷及停留时间见表 1),出水 TN 浓度为 14.08~21.70 mg/L;另外,进水的氨氮浓度在 24.57~29.34 mg/L 之间,氨氮的去除率为 36.04%~43.16%,出水氨氮浓度为 13.96~18.77 mg/L,达到了较好的出水水质。

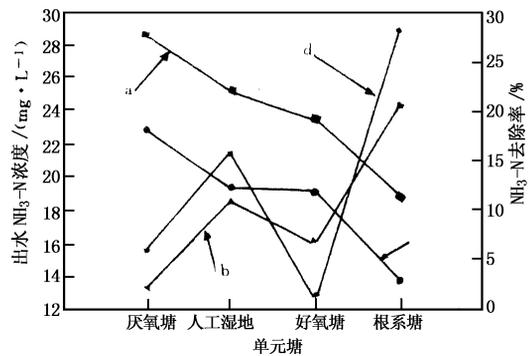
从图 2,3 可以看到,根系塘及人工湿地是氮的主要处理单元,其中 TN 的去除率分别为 27.83%~29.10%和 16.23%~19.53%;氨氮的去除率分别为 20.52%~28.01%和 11.88%~15.72%,TN 和 NH<sub>3</sub>-N 的去除量分别占总去除量的 90%以上。在植物生长期间(20~26 及 14~20 温度段),根系塘和人工湿地内密集的芦苇对氨氮的摄取量十分巨大,吸收作用是净化氮元素的主要过程;此外,根系塘人工湿地对氮具有更高的去除率,这与根系塘复杂的内部降解机制密切相关,Hansen 和 Andersen 进行的试验表明,芦苇根系统的内部拥有大量硝化细



a—14~20 TN 浓度;b—14~20 TN 去除率;  
c—20~26 TN 浓度;d—20~26 TN 去除率

图 2 20~26 和 14~20 温度段内各单元塘出水 TN 浓度及去除率变化曲线

Fig. 2 Effluent TN concentration and removal rate of nitrogen in each cell within the range of temperature 20~26 and 14~20 respectively



a—14~20 NH<sub>3</sub>-N 浓度;b—14~20 NH<sub>3</sub>-N 去除率  
c—20~26 NH<sub>3</sub>-N 浓度;d—20~26 NH<sub>3</sub>-N 去除率

图 3 20~26 和 14~20 温度段内各单元塘出水 NH<sub>3</sub>-N 浓度及去除率变化曲线

Fig. 3 Effluent concentration and removal rate of NH<sub>3</sub>-N in each cell within the range of temperature 20~26 and 14~20 respectively

菌,其氧化还原电位及硝化的速率均高于未生长水生植物的湖泊沉淀区。由于好氧和缺氧区的存在,微生物在根区系统的不同部分,通过硝化和反硝化大大提高了氮的去除效果<sup>[7]</sup>。

厌氧塘对氮有一定的去除效果,TN 及 NH<sub>3</sub>-N 的去除率分别为 7.81%~8.57%和 2.27%~5.90%。好氧塘对氮的去除非常不稳定,有时甚至出现 TN 和 NH<sub>3</sub>-N 的负增长。分析原因,厌氧塘和好氧塘底泥中的细菌和藻类物质被尸解后,往往

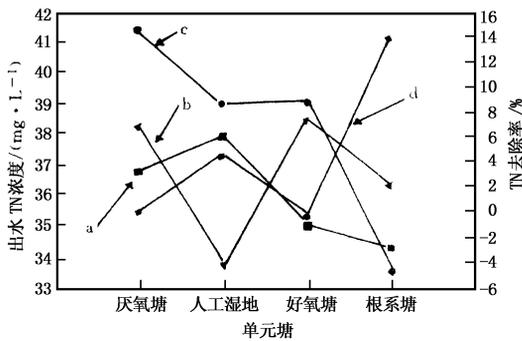
造成氨氮的二次溶出,因此, TN 和  $\text{NH}_3 - \text{N}$  在出水中的含量有时会有所上升;另外,在 14 ~ 20 温度段内,随着  $\text{BOD}_5$  面积负荷的降低,水力停留时间的加大,各单元对 TN 和  $\text{NH}_3 - \text{N}$  的去除率明显提高。

### 2.1.2 非植物生长期

在非植物生长期(0 ~ 8 及 8 ~ 12 温度段),进水总氮浓度为 39.25 ~ 41.51 mg/L,整个塘系统对总氮的去除在 5.78 % ~ 18.85 %之间(相应的有机负荷及停留时间见表 1),平均出水总氮浓度为 33.63 ~ 34.37 mg/L;相应的进水氨氮浓度为 31.75 ~ 39.96 mg/L,氨氮的去除率为 - 2.07 % ~ 17.89 %,出水氨氮浓度为 32.41 ~ 32.81 mg/L。

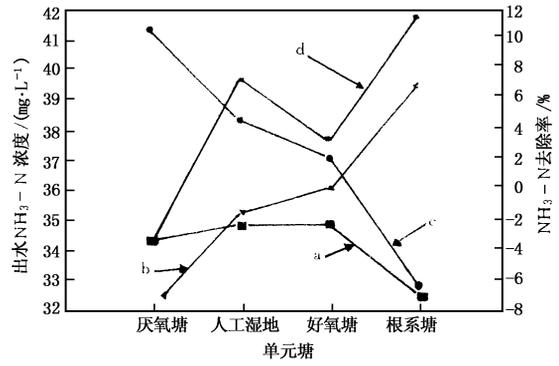
由于氮的去除取决于塘内细菌、藻类以及高等水生植物的生命活动,因此,在非植物生长期内,细菌、藻类以及高等水生植物的代谢活动缓慢,对于氮的去除效果也明显下降。从图 4,5 可以看到,在 8 ~ 12 温度段内,根系塘对 TN 和  $\text{NH}_3 - \text{N}$  仍有一定的去除效果,去除率分别为 14.05 % 和 11.47 %,人工湿地对 TN 和  $\text{NH}_3 - \text{N}$  的去除率分别为 5.74 % 和 7.49 %,说明塘内部分芦苇对氮仍有较低水平的需求。厌氧塘、好氧塘对氮的去除效果不明显,其中厌氧塘出水中的 TN 和  $\text{NH}_3 - \text{N}$  浓度略有增长。

当温度降至 0 ~ 8 时,厌氧塘、人工湿地、好氧塘及根系塘对氮(TN 和  $\text{NH}_3 - \text{N}$ )去除率均小于 8 %。其中厌氧塘和好氧塘仍有 6 % ~ 8 % 的 TN 去除率,此结果与这 2 个塘的水深较大,水力停留时间较长有关,而根系塘对  $\text{NH}_3 - \text{N}$  仍有 7 % 的去除率,说明在根系部分尚存在一定的硝化和反硝化作用。



a-0~8 TN 浓度;b-0~8 TN 去除率;  
c-8~12 TN 浓度;d-8~12 TN 去除率  
图 4 0~8 和 8~12 温度段内各单元塘出水 TN 浓度及去除率变化曲线

Fig. 4 Effluent TN concentration and removal rate of nitrogen in each cell within the range of temperature 0 ~ 8 and 8 ~ 12 respectively



a-0~8  $\text{NH}_3 - \text{N}$  浓度;b-0~8  $\text{NH}_3 - \text{N}$  去除率;  
c-8~12  $\text{NH}_3 - \text{N}$  浓度;d-8~12  $\text{NH}_3 - \text{N}$  去除率

图 5 0~8 和 8~12 温度段内各单元塘出水  $\text{NH}_3 - \text{N}$  浓度及去除率变化曲线

Fig. 5 Effluent concentration and removal rate of  $\text{NH}_3 - \text{N}$  in each cell within the range of temperature 0 ~ 8 and 8 ~ 12 respectively

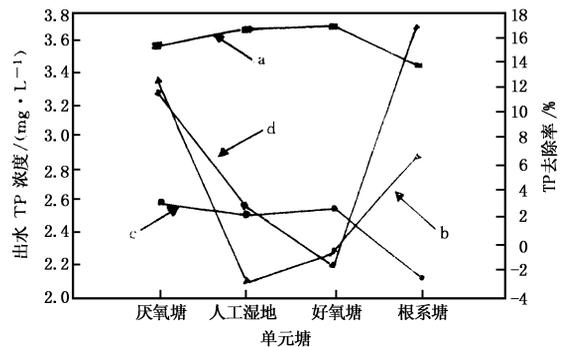
### 2.2 磷的去除规律

磷元素的转化途径主要为:有机磷在微生物作用下分解氧化,菌藻及其他生物吸收无机磷合成新细胞,以及可溶性磷与不可溶性磷之间的转化。

#### 2.2.1 植物生长期

复合生态塘系统对 TP 的去除也很有效。在植物生长期(20 ~ 26 及 14 ~ 20 温度段),进水 TP 为 2.95 ~ 4.12 mg/L,整个塘系统的 TP 去除率在 15.89 % ~ 27.64 %之间(相应的有机负荷及停留时间见表 1),出水 TP 浓度为 2.13 ~ 3.46 mg/L。

从沿程的总磷浓度变化(见图 6)看,厌氧塘和根系塘的总磷去除率均较高,去除率分别为



a-14~20 TP 浓度;b-14~20 TP 去除率;  
c-20~26 TP 浓度;d-20~26 TP 去除率

图 6 20~26 和 14~20 温度段内各单元塘出水 TP 浓度及去除率变化曲线

Fig. 6 Effluent TP concentration and removal rate of phosphors in each cell within the range of temperature 20 ~ 26 and 14 ~ 20 respectively

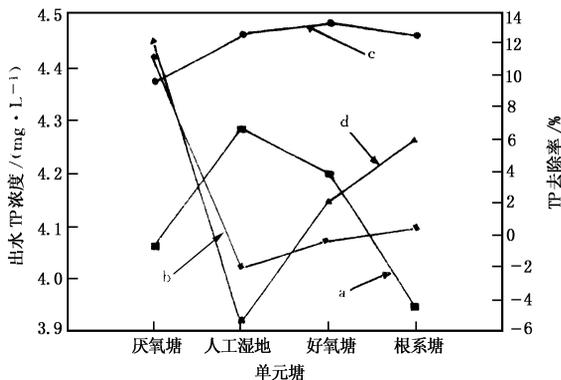
11.81%~12.75%和6.68%~16.61%,相应的出水TP浓度为2.60~3.59 mg/L和2.13~3.46 mg/L;兼性人工湿地的TP去除率平均为3.08%,相应的出水TP浓度为2.52~3.69 mg/L;好氧塘中的TP出现负增长,相应出水浓度为2.56~3.71 mg/L。

同总氮的去除类似,在植物生长期,各单元塘内的细菌、藻类及其他水生植物在进行新细胞的合成过程中摄取了过量的磷酸盐作为营养物质,从而使水中的磷得以去除。有资料表明,在所去除的磷酸盐中,约有1/10为藻类所吸收。从图6可以看出,厌氧塘内的有机负荷高,细菌的代谢活动旺盛,对磷的摄取能力强,另外,相当一部分可溶性磷酸盐与其他金属离子(如Fe<sup>3+</sup>)结合形成磷酸盐沉淀,因此,该单元有着较显著的去除磷效果。根系塘内茂密的芦苇在生长过程中摄取了大量的磷元素,特别是在20~26 温度段内,对磷的去除效果尤为显著。兼性塘和好氧塘中对磷的去除不明显,这一现象同塘底泥中的有机磷再释放有关,异氧生物对含磷物质仅作了形态上的转变,导致这2个单元塘对磷的去除能力降低。

### 2.2.2 非植物生长期

在非植物生长期(0~8 及8~12 温度段)内,系统TP的进水浓度为4.62~4.92 mg/L,TP在整个塘系统中的去除率在9.21%~14.65%之间(相应的有机负荷及停留时间见表1),出水TP浓度为3.95~4.46 mg/L。

从图7可以看到,在此期间内,整个系统对磷的



a—0~8 TP浓度;b—0~8 TP去除率;  
c—8~12 TP浓度;d—8~12 TP去除率

图7 0~8 和8~12 温度段内各单元塘出水TP浓度及去除率变化曲线

Fig. 7 Effluent TP concentration and removal rate of phosphors in each cell within the range of temperature 0~8 and 8~12 respectively

去除效果下降,但是,由于适当降低了进水有机负荷和水力负荷,厌氧塘和根系塘仍有一定的总磷去除效果,其中厌氧塘对磷的去除效果仍很好,去除率为11.18%~12.20%,相应的出水TP浓度为4.06~4.37 mg/L,根系塘在此期间的除磷效果有所降低,去除率为0.35%~5.93%,这说明较长的停留时间有利于微生物在活性很低的情况下去除一部分磷。兼性人工湿地和好氧塘中的总磷浓度出现负增长,相应的出水浓度分别为4.28~4.46 mg/L和4.20~4.48 mg/L。

在非植物生长期内,系统对磷的去除效果下降的原因可以归结于: 低温时各种生物的活性减弱,对磷的摄取能力降低; 塘中底泥厌氧降解使一些磷酸盐析出。

### 3 结论

a. 在植物生长期,兼性人工湿地和根系塘中由于芦苇的茂密生长,因此对氮和磷具有十分显著的去除作用,而且根系塘作为系统的最后处理单元,避免了出水中由于氮和磷过量造成的藻类过度繁殖,保证了出水水质。

b. 厌氧塘和好氧塘具有一定的氮和磷的去除效果,尤其在非植物生长期,由于较大的水深和较长的水力停留时间,保证了这2个单元仍能具有一定的氮和磷的去除效果。

c. 适当降低BOD<sub>5</sub>表面负荷或延长水力停留时间,可以大大提高各单元塘对氮和磷的去除效果。根据试验结果,系统的水力停留时间在植物生长期内不小于6 d,可以获得50%~60%的氮和磷的去除率;在非植物生长期内不小于20 d,氮和磷的去除率在10%~20%之间。

### 参考文献:

- [1] 高拯民,李宪法. 城市污水的土地处理利用设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1991. 89~102.
- [2] 杨文进,祁佩时. 城市污水稳定塘设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1990. 119~124.
- [3] 王宝贞,祁佩时. 安达污水氧化塘研究[R]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学,1990.
- [4] 王宝贞,祁佩时. 齐齐哈尔污水氧化塘研究[R]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学,1990.
- [5] 王宝贞,祁佩时. 内蒙古集宁污水氧化塘研究[R]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学,1995.
- [6] Conley L M, et al. An assessment of the root zone method of wastewater treatment[J]. Research Journal WPCF, 1991, V63.
- [7] Hansen J I, Andersen F O. Effects of phragmites roots and rhizomes on nitrification and Bacterial numbers in the Ediments[A]. Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Ediments [C]. Norr. Malmo, Weden 1981. 68~71.